第48卷　第1期
2025年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48　No. 1
Jan. 2025

基于二次平均状态的土地砾化程度监测评估研究

叶　虎[1,2]，裴　浩[2,3]，苗百岭[2,4]，姜艳丰[2,4]，徐丽娜[1,2]，贾成朕[2,4]

（1. 内蒙古自治区气象服务中心，内蒙古 呼和浩特　010051；2. 内蒙古自治区荒漠生态气象中心，内蒙古 呼和浩特　010051；3. 内蒙古自治区气象局，内蒙古 呼和浩特　010051；4. 内蒙古自治区气象科学研究所，内蒙古 呼和浩特　010051）

摘　要：为了从取样、测量到评估分析全流程提高土地砾化程度监测指标——地表砾石覆盖度的监测评估精度，以内蒙古高原西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市为研究区，设计不同尺寸的样方，开展二次平均状态取样方法研究。采用地面测量法和测量盘法对比确定小样方中砾石覆盖度的最佳测量方法，通过大、小样方平均数和中位数的统计特征分析确定大样方及样地砾石覆盖度的最佳评估方式。同时，探讨了构建"仿生态学"的必要性和初步思路。结果表明：(1) 二次平均状态法通过缩减样方尺寸、增加样本数量的方式，使样本更具代表性，且样方尺寸的减小可使测量盘的尺寸随之缩减，有助于进一步提高地表砾石覆盖度测量精度。(2) 由小样方到大样方再到样地，数据的离散程度越来越小，右偏及尖峰型分布越来越明显，研究区砾化程度的总体特征越来越凸显，同时大样方及样地的砾石覆盖度、地表单位面积砾石质量相关性较高，说明基于二次平均状态取样的土地砾化程度监测结果具有较高的精确度和稳定性，可用于改进土地砾化程度监测流程及精度，并提高野外工作效率。

关 键 词：砾化土地；地表砾石覆盖度；地表单位面积砾石质量；二次平均状态；仿生态学

文章编号：1000－6060(2025)01－0085－09(0085～0093)

通常直径>2 mm，相对独立、不易破碎的岩石碎屑被称为砾石[1-2]。砾石是各种风化、侵蚀等过程综合作用的产物，其存在形态包括分布于土壤表面、部分嵌入土壤以及完全埋藏于土壤中3种。土地砾石化（以下简称砾化）是一种土地表层砾石量或比例增加且比沙化更为严重的荒漠化过程[3]，且土地砾化不仅发生在干旱少雨的荒漠区，也会发生在草原区和森林区，现代的砾化往往与人类对土地的过度利用和破坏有关[4]。

土地的砾化程度是表征土壤退化和生态系统恶化的重要参数之一[5]，可以用地表砾石覆盖度、砾石质量含量、单位面积地表砾石质量、单位面积地表砾石体积、单位面积地表砾石数量、土地表层单位体积砾石质量、单位质量土壤中砾石质量等指标衡量。其中，砾石覆盖度、单位面积砾石质量作为衡量土地砾化程度的常用指标，其定量化监测方法研究具有重要的理论意义和应用价值。

砾石覆盖度是指砾石的垂直投影面积占地表取样总面积的百分比[4]。由于砾石覆盖度的定量化监测包括取样及测量2部分，因此其精度由取样精度及测量精度共同决定。目前，常用的测量方法包括背景色照片法[4]、测量盘法[6]、视点框架法[7]、米格纸投影法[8]、图像法[9-10]等。高杨等[7]对比了视点框架法和图像法对不同粒径样本下（2~6 mm、6~20 mm、20~60 mm）的砾石覆盖度的测量精度，发现2种测量方法均能达到一定精度，图像法对小粒径砾石覆盖的观测能力相对较弱，精度较差，而对粒径为6~20 mm和20~60 mm覆盖度的观测精度优于视点框

收稿日期：2024-01-19；　修订日期：2024-05-09
基金项目：内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0092，2021GG0307)；内蒙古自治区气象局防灾减灾专项资助
作者简介：叶虎(1980-)，男，硕士，高级工程师，主要从事专业气象应用技术研究. E-mail: yehu_135@sina.com.cn
通讯作者：裴浩(1963-)，男，硕士，正研，主要从事生态、遥感技术研究. E-mail: peihao5217@sohu.com

架法。背景色照片法与传统图像法相比，克服了原地照片无法区分沙粒和砾石以及植被覆盖对砾石提取的干扰等问题，同时增加了对比度，使测定结果更为准确[4]。温文杰等[6]采用测量盘法对阿拉善高原土地砾化特征进行研究，得出不同粒径（总）的砾石覆盖度与单位面积砾石质量均呈极显著的一元线性回归关系，且砾石覆盖度与单位面积砾石质量均呈现出由东向西及由南向北的递增趋势。与背景色照片法相比较，测量盘法易于操作、对测定环境要求不高、更适合野外实地使用，但是由于砾石平铺在测量盘中时可能出现砾石间叠置和空隙的问题，可能会导致测量精度下降[11]。

除了上述测量方法存在的误差外，取样所用样方的大小同样对砾石覆盖度的监测精度具有一定影响。在前期的研究中，样方的采集方法通常为：在确定选择的每一个样地中，选取3~5个砾石覆盖平均状态处面积为50 cm×50 cm 的样方[5-6]。然而，以较大样方为参照系时，人脑很难根据参照系推定被测定对象的面积尺度，样方越大，测量误差越大。

因此，本文在前期研究基础上，结合野外采样经验，提出一种新的砾石取样方法——二次平均状态法，即在第一个50 cm×50 cm 样方的平均状态基础上，进一步选取平均状态，设置至少3个10 cm×10 cm的小样方。基于二次平均状态法进行大、小样方的布设，再分别采用地面测量法、测量盘法对小样方中砾石覆盖度进行测量，测量盘的尺寸也由原来的30 cm×15 cm减小至10 cm×5 cm（或10 cm×10 cm），由此确定小样方中砾石覆盖度的最佳测量方法。再通过大、小样方平均数和中位数的统计特征分析，确定大样方及样地砾石覆盖度的最佳评估方式，并达到对二次平均状态法取样方法的可行性以及监测结果的稳定性等进行验证的目的。通过本研究，以期从取样、测量到评估分析全流程提高地表砾石覆盖度的监测评估精度，从而确定一种更为精准、完善的土地砾化程度监测评估方法。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

选取位于内蒙古高原西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市为研究区（图1）。其中，阿拉善盟位于37.5°~42.6°N、93.1°~106.6°E，地势微向北倾，平均海拔

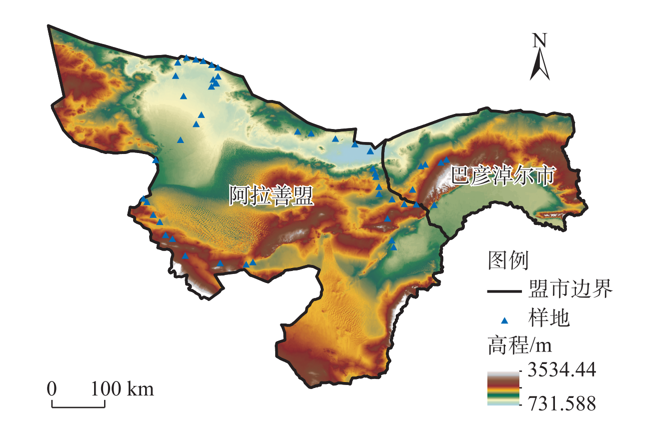


图1 样地分布示意图

Fig. 1 Diagram of the sample plots distribution

900~1400 m，面积约270000 km²，沙漠和戈壁广泛分布[12]，为典型温带大陆性气候，干旱少雨、风大沙多，冬寒夏热，昼夜温差大，是中国沙尘暴的重要发源地之一。巴彦淖尔市位于40.2°~42.8°N、105.2°~109.9°E，面积65000 km²，属典型中温带大陆性季风气候，地势中间高、南北低，由东西走向的阴山山脉分割成南北不同的自然地貌，即北部为内蒙古高原，海拔1000~1400 m，中部为阴山山脉，海拔1500~2200 m，南部为河套平原，海拔1030~1050 m。阴山山地按形态特征可进一步划分为中低山、低山丘陵、山间盆地及沟谷4种地貌类型，受水土流失、风蚀等因素影响，砾石多分布于低山丘陵和山间盆地地带。

研究区内，在沙被和土层较厚的沙漠、绿洲、盐碱地和湖底，其砾石覆盖度近乎为零，在本次研究过程中对上述区域多个样地进行踏勘，确认砾石存在情况并记录；在不同程度土地砾化的区域，选取不同地貌、不同植被类型、不同砾化程度且相对平坦开阔处（山地和丘陵则选择顶部、中部和下部），作为地表砾石覆盖度测定样地，开展研究工作。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 样方大小和数量直接影响野外实地取样的代表性及精准度，通常大小、数量适中的样方有助于较为高效地获取更全面、准确的调查数据。传统取样方法[5-6]通过参照草本植被监测样方尺寸与植物冠幅的比例确定砾石监测样方的尺寸：一般地，较大的单株、单丛植物尺寸一般在20 cm以上，监测样方的大小一般为1 m×1 m，两者比值为1:5，而通常砾石粒径最大不超过10 cm，由此确定用于

砾石覆盖度监测的样方尺寸为50 cm×50 cm。然而，本文考虑到研究区砾石粒径普遍小于2 cm，因此在50 cm×50 cm的大样方尺寸基础上，进一步确定小样方尺寸为10 cm×10 cm。

在大量野外调查采样经验的基础上，本文首次提出并采用二次平均状态法，进行样本采集。二次平均状态法具体为：首先在每一个样地中，通过踏勘了解样地地表砾石分布的总体情况，掌握砾石覆盖度的差异，排除砾石覆盖度较低、较高的部分，选取砾石覆盖平均状态处，布设3~5个面积为50 cm×50 cm的大样方，再在每一个大样方内砾石覆盖平均状态处设置至少3个10 cm×10 cm的小样方（图2）。由此可见，相较于传统取样方法，二次平均状态法在将样方缩减至适当尺寸的同时，使样本的数量增加至大样方数量的3倍以上，进而可以达到提升样本代表性、有效降低测量误差的目的。



图2　二次平均状态法样本采集展示

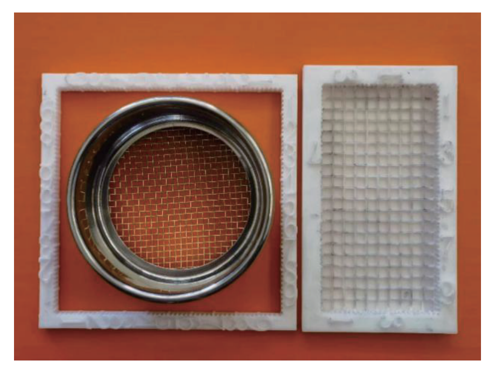
Fig. 2　Presentation of the sample collection using the secondary average state method

1.2.2　测量方法　依次采用地面测量法、测量盘法测得各小样方内砾石覆盖度，分别构成地面测量法砾石覆盖度样本数据和测量盘法砾石覆盖度样本数据，再使用精度为0.1 g的电子天平测量各小样方内的地表砾石质量，构成单位面积地表砾石质量样本数据。本文研究所用砾石样本采集于2023年9月15日—2023年9月22日，共获取到50个样地、179个大样方、540个样本（小样方）的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量数据。具体监测步骤如下：

（1）采用地面测量法，即把小样方内的砾石集中于小样方一侧（一角），使砾石间紧挨且不叠压，形成一个矩形砾石覆盖区域，通过读取小样方相邻边框上的刻度数据（长与宽），即可得到砾石覆盖的面积值，因为小样方面积为100 cm^2，所以面积值即为砾石覆盖度。

（2）收集每个小样方内地表全部砾石置于测量盘中，尽量紧密且互相不遮盖地平铺于测量盘中，根据测量盘长和宽的读数求得测量盘法砾石覆盖度。为了区分开2 mm左右的砾石和沙粒，实地使用孔径为2 mm的砾石筛，筛分砾石与沙粒等细粒物质，避免用测量盘法测量砾石覆盖度时沙粒的混入对结果造成影响。测量盘过大，可能会使砾石间空隙过多，测量盘过小，更易造成砾石间叠置并增加测量次数，都可能导致测量精度下降。因此，本次研究中，结合研究区砾石粒径，使用测量盘尺寸为10 cm×5 cm，长、宽都是原有大测量盘（30 cm×15 cm）的1/3，当对超出10 cm×5 cm测量盘尺寸的较大粒径的砾石进行测量时，使用10 cm×10 cm测量盘。本次研究中使用的测量盘、小样方、砾石筛等测量工具如图3所示。

(a) 小样方、砾石筛与10 cm×5 cm测量盘



(b) 10 cm×10 cm与10 cm×5 cm测量盘

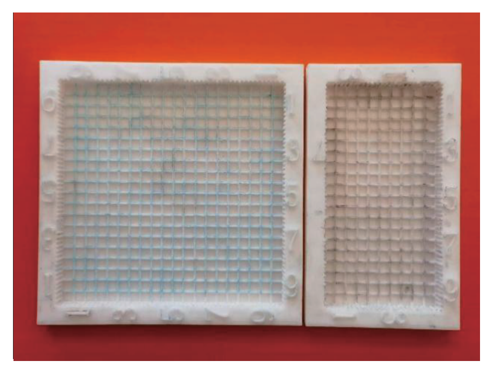


图3　测量工具展示

Fig. 3　Presentation of the measuring tools

(3) 将测量盘测量后的每个小样方内地表全部砾石收集装袋,使用电子天平对其称重,得到单位面积地表砾石质量。

1.2.3 评估方法 算术平均数和中位数均为度量数据水平常用的统计量。算术平均数易受一组数据中极端数值的影响,而中位数由于不易受其影响,常用来描述一组数据的集中趋势。本文对每个大样方中样本的地面测量法砾石覆盖度、测量盘法砾石覆盖度、单位面积地表砾石质量分别求取平均值和中值,通过标准差、变异系数、偏度以及与单位面积地表砾石质量的相关性等分析,确定一种最佳的大样方及样地砾石覆盖度评估方式。

标准差(σ)是在概率统计中最常使用的作为统计分布程度的统计量。其定义为样本与其平均值离差平方的算术平均数的平方根。它反映组内个体间的离散程度,会受到极值的影响,标准差越小,表明数据越聚集;标准差越大,表明数据越离散。计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2}{n}} \tag{1}$$

式中:$\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 为一组样本;n 为样本个数;μ 为样本平均值。

变异系数(C_v),又称离散系数,是概率分布离散程度的一个归一化统计量,其定义为标准差与平均值之比,由此可见,变异系数可以消除单位或平均数不同对2个或多个资料变异(离散)程度比较的影响。计算公式如下:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \tag{2}$$

偏度(S_k),又称偏态、偏态系数,是统计数据分布偏斜方向和程度的统计量,表征概率分布密度曲线相对于平均值不对称程度的特征数,其定义为样本的三阶标准化矩。在一般情形下,当统计数据为右偏分布时,$S_k>0$,且 S_k 值越大,右偏程度越高;当统计数据为左偏分布时,$S_k<0$,且 S_k 值越小,左偏程度越高;当统计数据为对称分布时,$S_k=0$。计算公式如下:

$$S_k = \left[\frac{n}{(n-1)(n-2)}\right] \times \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^3}{\sigma^3} \tag{3}$$

峰度(K_E)是描述总体中所有取值分布形态陡缓程度的统计量。$K_E=0$,表示该总体数据分布与正态分布的陡缓程度相同;$K_E>0$,表示该总体数据分布与正态分布相比较为陡峭,为尖顶峰;$K_E<0$,表示该总体数据分布与正态分布相比较为平坦,为平顶峰。峰度的绝对值数值越大表示其分布形态的陡缓程度与正态分布的差异程度越大。计算公式如下:

$$K_E = \frac{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^4}{\sigma^4} - 3 \tag{4}$$

相关系数(r)是研究变量之间线性相关程度的量,由于研究对象的不同,相关系数有多种定义方式,较为常用的是皮尔逊相关系数。计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{1i}-\mu_1)(x_{2i}-\mu_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{1i}-\mu_1)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{2i}-\mu_2)^2}} \tag{5}$$

式中:$\{x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1n}\}$、$\{x_{21}, x_{22}, \cdots, x_{2n}\}$ 为不同的2组样本;μ_1、μ_2 分别为2组样本的平均值。

2 结果与分析

2.1 小样方砾石覆盖度测量结果

540个小样方的地面测量法砾石覆盖度、测量盘法砾石覆盖度以及单位面积地表砾石质量的统计值如表1所示。可见,研究区内砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量分布极为不均匀,尤其是单位面积地表砾石质量由于受砾石粒径、成分等因素不同影响,导致最小值和最大值之间差异较大,且由于个别极端值的存在,会使得数据分布呈现尖峰

表1 小样方砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的统计值

Tab. 1 Statistical values of the coverage and the surface gravel mass per unit area in the small samples

测量结果	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数	偏度	峰度
地面测量法砾石覆盖度	6.0%	93.0%	38.6%	38.0%	17.6%	0.457	0.405	−0.389
测量盘法砾石覆盖度	3.0%	96.0%	38.7%	38.7%	18.0%	0.465	0.452	−0.311
单位面积地表砾石质量	2.2 g	912.0 g	42.3 g	36.4 g	45.8 g	1.082	13.057	244.280

型。但是单位面积地表砾石质量是通过电子天平测定的，因此初步判定其误差最小。地面测量法与测量盘法测量结果之间差别不大，与单位面积地表砾石质量的相关系数分别为0.539和0.554，均通过了 $\alpha=0.01$ 的置信度检验，由此可见，测量盘法的测量精度略高于地面测量法。地面测量法砾石覆盖度的最小值大于测量盘法砾石覆盖度，可能是地面测量法在测量过程中沙粒的混入造成的，而地面测量法砾石覆盖度的最大值小于测量盘法砾石覆盖度，本文认为是由于地面测量法在测量过程中更易造成砾石的堆叠导致的。测量盘法测量结果的标准差、变异系数、偏度、峰度均略大于地面测量法的测量结果，说明测量盘法的测量结果数据分布更为集中，且相对集中的位置更偏向左侧。从两者的概率密度分布(图4)上看，样本主要分布在20%~50%的砾石覆盖度区间内。

2.2 大样方砾石覆盖度评估

首先分别计算179个大样方的地面测量法砾石覆盖度、测量盘法砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的平均数和中位数，再依次计算每组平均数和中位数的标准差、变异系数、偏度和峰度，结果如表2所示。

同样，一个大样方内可能存在砾石覆盖平均状态处的砾石粒径、质量差别较大的情况，由此导致同一个大样方内几个样本的质量差别较大，而平均数会受到一组数据中极端数值的影响，导致其标准差、变异系数、偏度、峰度相对于中位数明显偏大。因此，本文认为通过样本中位数的计算得到大样方

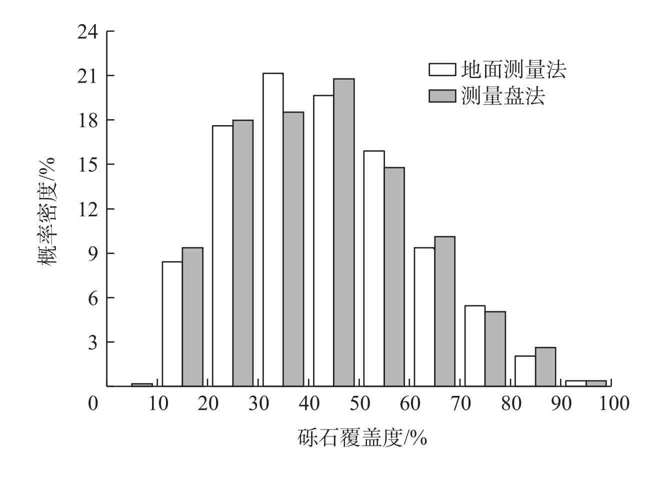


图4 地面测量法和测量盘法测量结果的概率密度

Fig. 4 Probability density of measurement results by ground measurement method and measuring disk method

表2 大样方砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的平均数和中位数评估方法对比

Tab. 2 Comparison of evaluation methods of the average and median for the coverage and the surface gravel mass per unit area in the large samples

测量结果	计算方法	标准差	变异系数	偏度	峰度
地面测量法砾石覆盖度	平均数	16.6%	0.432	0.322	−0.512
	中位数	17.0%	0.440	0.368	−0.411
测量盘法砾石覆盖度	平均数	17.1%	0.444	0.386	−0.388
	中位数	17.2%	0.449	0.462	−0.129
单位面积地表砾石质量	平均数	33.4 g	0.791	4.890	43.336
	中位数	23.8 g	0.598	0.690	−0.134

表3 大样方砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的相关系数对比

Tab. 3 Comparison of the correlation coefficient between the coverage and the surface gravel mass per unit area in the large samples

测量结果	计算方法	单位面积地表砾石质量	
		平均数	中位数
地面测量法砾石覆盖度	平均数	0.691	0.851
	中位数	0.723	0.858
测量盘法砾石覆盖度	平均数	0.692	0.874
	中位数	0.707	0.877

的单位面积地表砾石质量，可以避免其受到极端数值的影响，更为稳定，更能反映砾石质量存在的普遍状态。

地面测量法砾石覆盖度、测量盘法砾石覆盖度平均数和中位数的标准差、变异系数、偏度、峰度均差别不大，平均数的离散程度和偏度略小，且平均数的分布相较于中位数呈现更为平峰的特征。但是在砾石覆盖度测量时排除了砾石覆盖度较低、较高的部分，遵循的是二次平均状态原则，因此本文认为通过样本中位数的计算得到大样方的砾石覆盖度，更能反映研究区总体的砾化水平。

分别计算地面测量法砾石覆盖度、测量盘法砾石覆盖度平均数和中位数与单位面积地表砾石质量平均数与中位数的相关系数，结果如表3所示。可见，地面测量法砾石覆盖度、测量盘法砾石覆盖度的平均数与单位面积地表砾石质量的平均数相关性最低，分别为0.691和0.692，两者的中位数与单位面积地表砾石质量的中位数相关性最高，分别为0.858和0.877，由此进一步说明通过样本中位数计

算得到的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量在空间上的分布规律更为一致,且测量盘法砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的相关性更高。

综上得出,评估每一个大样方的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量时,中位数评估方法要优于平均数评估方法,测量盘法测量的砾石覆盖度较地面测量方法测得的数据精度更高。

2.3 样地砾石覆盖度评估

本文利用测量盘法测量的样本砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量的中位数代表大样方的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量,进一步进行样地砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量的平均数和中位数计算,并对其标准差、变异系数、偏度、峰度进行分析,结果如表4所示。可见,与大样方计算结果不同的是,中位数的离散程度和偏度略小,且平峰型分布特征略为明显。因此,本文认为对大样方的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量求取平均数,计算样地的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量,可以更好地遵循二次平均状态原则。

分别计算样地砾石覆盖度平均数和中位数与单位面积地表砾石质量平均数和中位数之间的相关系数,结果如表5所示。同样发现,对大样方的砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量求取平均数,得到的样地砾石覆盖度和单位面积地表砾石质量的相关性最高,为0.936,两者的散点分布如图5所示。可见,样本点基本围绕在线性回归线两侧分布,离散程度很小,说明在实际工作中,当样地砾石覆盖度或单位面积地表砾石质量有缺失时,利用两者的线性关系进行插补是可行的,同时也说明地表单位面积砾石质量也是监测土地砾化程度的有效指标。

综上分析,得到研究区内样地砾石覆盖度为11%~88%,平均值为39.15%。苗百岭等[4]采用地表砾石覆盖度划分砾化程度阈值范围和等级,依据该阈值进行样地砾化程度等级划分(表6)。由于取样时排除了砾石覆盖度较低、较高的部分,因此所选样地砾化程度主要集中在中度砾化、重度砾化Ⅰ、重度砾化Ⅱ 3个等级,样地数量占比分别为22%、34%和42%。样地砾化程度等级分布如图6所示,中度砾化主要位于巴丹吉林南部石质残山山前冲洪平原地带的细砾质戈壁,临近沙漠地带砾石覆盖度降低;重度砾化Ⅰ分散的位于各处冲积-洪积沙质或中砾质戈壁上,主要是砾沙混合物受强风力侵蚀作用,表面细小物质被吹走,余下砾石残余物;重度砾化Ⅱ主要位于额济纳旗噶顺淖尔北部和银根

表4 样地砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的平均数和中位数评估方法对比

Tab. 4 Comparison of evaluation methods of the average and median for the coverage and the surface gravel mass per unit area in the sample plots

测量结果	计算方法	标准差	变异系数	偏度	峰度
测量盘法砾石覆盖度	平均数	16.703%	0.434	0.669	0.316
	中位数	16.561%	0.423	0.570	0.207
单位面积地表砾石质量	平均数	21.787 g	0.544	0.566	−0.372
	中位数	21.024 g	0.523	0.349	−0.510

表5 样地砾石覆盖度与单位面积地表砾石质量的相关系数对比

Tab. 5 Comparison of the correlation coefficient between the coverage and the surface gravel mass per unit area in the sample plots

测量结果	计算方法	单位面积地表砾石质量	
		平均数	中位数
测量盘法砾石覆盖度	平均数	0.936	0.913
	中位数	0.915	0.923

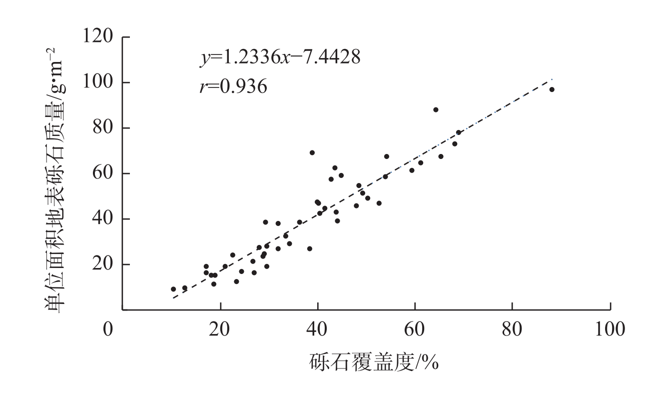


图5 样地单位面积地表砾石质量随样地砾石覆盖度的分布

Fig. 5 Distribution of the surface gravel mass per unit area as a function of the surface gravel coverage in the sample plots

表6 基于地表砾石覆盖度的砾化程度等级划分

Tab. 6 Classification of gravelization degree based on surface gravel coverage

砾化程度	地表砾石覆盖度/%	样地数量占比/%
轻度砾化	(2, 10]	0
中度砾化	(10, 25]	22
重度砾化Ⅰ	(25, 40]	34
重度砾化Ⅱ	(40, 70]	42
重度砾化Ⅲ	(70, 100]	2

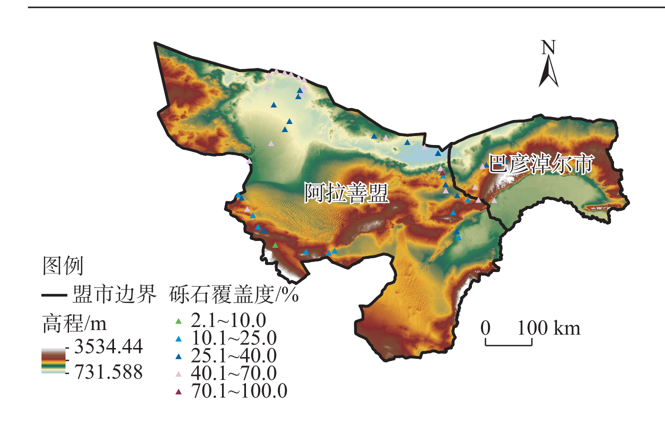


图6　样地砾化程度等级分布

Fig. 6　Gravelization level distribution of the sample plots

北部戈壁，为剥蚀–坡积–洪积物组成的石质粗砾或中砾戈壁[13]；重度砾化Ⅲ主要位于银根盆地北部石质残山上部和靠近山体的地方，为典型剥蚀–残积物组成的剥蚀残丘型石质粗砾戈壁[14]。

3　讨 论

已有的土地砾化程度评价研究中，多通过地表砾石覆盖度对土地砾化程度进行评估[4]，其测量方法主要分为目视法、地面实测和数字图像法[15-17]3类。然而，本文发现地表单位面积砾石质量也是评估土地砾化程度的有效指标，且在相同地表砾石覆盖度下，地表单位面积砾石质量越大，地表砾化程度越严重。因此，在下一步工作中，通过归一化或无量纲处理，利用地表砾石覆盖度、地表单位面积砾石质量，构建土地砾化程度评估综合指标，开展更为精准的土地砾化程度监测评估工作。

此外，实测调查法是目前地表砾石覆盖度监测的主要方法，虽然相对于遥感解译方法具有更高的准确性，但是其往往受限于成本昂贵等因素，只能在重点区域开展工作，因此如何合理地将实测调查与遥感解译高效科学地结合起来，也是未来砾化土地监测评估工作的一个研究重点[18]。

随着土地砾化程度的加剧和砾化土地面积的增加，土地砾化的负面生态效应逐渐变得明显，其不良影响涉及生态、生产生活等诸多方面，砾化生态系统（砾化土地）的修复十分必要和迫切，即将成为生态学研究中的又一重要课题，其主要内容是人为砾化生态系统和人为+自然的砾化生态系统的修复。针对砾化土地修复乃至生态建设，本文认为有必要提出并构建“仿生态学”学科体系。“仿生态学”是基于对自然生态系统的组成、结构、动态及其地学、水文、气象等自然要素的特征和规律的深刻认识，通过模仿自然生态系统的组成、结构和功能进行退化（包括砾化）土地修复和生态建设，使生态工程建设或人类活动可以获得更优良的生态效应的学科。砾化生态系统修复必须树立和坚持尊重自然规律、以自然恢复为主、自然恢复与人工修复相结合、因地制宜、以自然降水定绿、分类施策、系统综合的生态治理理念，以“仿生态学”作为指导砾化生态系统修复、生态建设实践的理论基础和方法指南，进而促进生态建设效应的提高和可持续高质量发展。

4　结 论

（1）二次平均状态法在保留了测量盘法易于操作、对测定环境要求不高、更适合野外实地使用等优点的同时，通过缩减样方尺寸、增加样本数量的方式，可以使所选样本更具代表性，增加样本反映样地实际情况的能力。

（2）样方尺寸的减小可使测量盘的尺寸随之缩减，可以更为细致地对砾石进行摆布，有效减少砾石间的叠置和空隙，测量精度更高。

（3）虽然地表单位面积砾石质量受极端值的影响较大，但其与地表砾石覆盖度仍表现出较好的相关性，相关程度依次为样地>大样方>小样方，因此地表单位面积砾石质量也是监测土地砾化程度的有效指标。

（4）由小样方到大样方再到样地，数据的离散程度越来越小，右偏及尖峰型分布越来越明显，研究区砾化程度的总体特征越来越凸显。

（5）通过样本中位数与大样方平均数分别对大样方与样地的砾石覆盖度进行评估，更能凸显样方选取时遵循的二次平均状态原则，且与单位面积地表砾石质量的评估结果具有较好的一致性，说明基于二次平均状态取样的土地砾化程度监测结果具有较高的精确度和稳定性。

参考文献（References）

[1]　Miller F T, Guthrie R L. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 13: 1-6.

[2]　谢迎革, 李霞. 土壤中砾石含量的测定方法研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(1): 17-22. [Xie Yingge, Li Xia. Methodology on rock

fragments content evaluation: A review[J]. Soils, 2012, 44(1): 17-22.]

[3] 裴浩, 吴昊, 关彦如, 等. 土地沙化定义及其与沙被、草原退化、荒漠化关系的探讨[J]. 内蒙古气象, 2022(1): 16-23. [Pei Hao, Wu Hao, Guan Yanru, et al. Definition of land sandification and its relationship with desertification, grassland degradation and desertification[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2022(1): 16-23.]

[4] 苗百岭, 裴浩, 贾成朕, 等. 砾化土地类型、监测指标及生态治理对策[J]. 内蒙古气象, 2021(6): 37-43. [Miao Bailing, Pei Hao, Jia Chengzhen, et al. Classification, monitoring indicators and ecologically-based management of gravelization land[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2021(6): 37-43.]

[5] 高杨, 符素华, 罗来军, 等. 北京山区砾石覆盖度和砾石含量的关系研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 145-149. [Gao Yang, Fu Suhua, Luo Laijun, et al. Study on the relationship between rock fragments cover and weight percentage in Beijing mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(4): 145-149.]

[6] 温文杰, 裴浩, 巴根, 等. 阿拉善高原土地砾化特征及监测指标[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 926-936. [Wen Wenjie, Pei Hao, Ba Gen, et al. Land graveling characteristics and monitoring indicators of the Alxa Plateau[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 926-936.]

[7] 高杨, 符素华, 罗来军, 等. 砾石覆盖度测量方法研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 264-267, 270. [Gao Yang, Fu Suhua, Luo Laijun, et al. A study on measurement methods of rock fragment cover[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 264-267, 270.]

[8] 张克存, 张伟民, 屈建军, 等. 不同砾石盖度戈壁床面动力学特征研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1077-1082. [Zhang Kecun, Zhang Weimin, Qu Jianjun, et al. Study on dynamaic properties of gobi surface with different gravel coverage[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 1077-1082.]

[9] Mu Y, Wang F, Zheng B Y, et al. McGET: A rapid image-based method to determine the morphological characteristics of gravels on the gobi desert surface[J]. Geomorphology, 2018, 304: 89-98.

[10] 高君亮, 高永, 吴波, 等. 戈壁地表土壤颗粒的空间变异特征研究[J]. 土壤, 2019, 51(1): 135-141. [Gao Junliang, Gao Yong, Wu Bo, et al. Spatial heterogeneity of topsoil particles in Jartai Gobi, Inner Mongolia[J]. Soils, 2019, 51(1): 135-141.]

[11] 黄佳轮, 安凯旋, 陈汉林, 等. 野外砾石统计方法的应用与对比[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(5): 601-614. [Huang Jialun, An Kaixuan, Chen Hanlin, et al. Application and comparison of field gravel statistical methods[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2020, 47(5): 601-614.]

[12] 中国黑戈壁地区生态本底科学考察队. 中国黑戈壁研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Scientific Team of Ecological Background in Black Gobi Area of China. A study on the Black Gobi in China[M]. Beijing: Science Press, 2014.]

[13] 张正偲, 潘凯佳, 张焱, 等. 中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 130-138. [Zhang Zhengcai, Pan Kaijia, Zhang Yan, et al. Sand transport characteristics above gobi surface during a dust storm in northern China[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2): 130-138.]

[14] 陈曦, 胡汝骥, 姜逢清, 等. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [Chen Xi, Hu Ruji, Jiang Fengqing, et al. Natural geography of arid areas in China[M]. Beijing: Science Press, 2010.]

[15] 王鹿振. 基于数字图像处理的风蚀地表粗化信息提取研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010. [Wang Luzhen. Grain size information acquision from erodible sandy surfaces based on digital image processing [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.]

[16] 高君亮, 高永, 虞毅, 等. 基于数字图像处理技术的风蚀地表颗粒提取[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 139-142. [Gao Junliang, Gao Yong, Yu Yi, et al. Particles extracted from wind erosion surface based on digital image process technology[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 139-142.]

[17] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 基于数字图像的中国西北地区戈壁表面砾石形貌特征研究[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 625-633. [Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. Gravel morphometric analysis based on digital images of different gobi surface in northwestern China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 625-633.]

[18] 陈谢扬, 李同昇, 朱小青, 等. 基于实际调查与观测解译对比验证的土地沙漠化敏感性评价——以陕西省为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1813-1825. [Chen Xieyang, Li Tongsheng, Zhu Xiaoqing, et al. Evaluation of land desertification sensitivity based on comparison and verification of actual investigation and observation interpretation: A case of Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1813-1825.]

Monitoring and evaluation of land gravel coverage based on secondary average state

YE Hu[1,2], PEI Hao[2,3], MIAO Bailing[2,4], JIANG Yanfeng[2,4], XU Lina[1,2], JIA Chengzhen[2,4]

(1. Inner Mongolia Service Center of Meteorology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Desert Ecological Meteorological Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 4. Inner Mongolia Meteorological Science Research Institute, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: To enhance the accuracy of monitoring and assessing surface gravel coverage throughout the sampling, measurement, and evaluation process, Alagxa League and Bayannur City in the western Inner Mongolian Plateau, China, were selected as the study area. Various sample sizes were designed, and research on the sampling method of the secondary average state was conducted. The optimal measurement method for small sample gravel coverage was determined by comparing the measurement disk method with the ground measurement method. The most suitable evaluation method for large sample gravel coverage was identified by analyzing the statistical characteristics of the average and median gravel coverage values in small samples. The same methodology was applied to evaluate the gravel coverage in sample plots. Additionally, the necessity and preliminary considerations for constructing imitative ecology are discussed. The results showed that: (1) The secondary average state method enhances sample representativeness through two pathways—reducing sample sizes while increasing sample quantities. Consequently, the size of the measurement disk is reduced, which further improves the accuracy of surface gravel coverage measurements. (2) Data dispersion decreases, and the characteristics of right-skewed and peaked distributions become more prominent progressively for small samples, large samples, and sample plots. This indicates that the overall characteristics of gravelized land in the study area become increasingly distinct. Gravel coverage is strongly correlated with the surface gravel mass per unit area, demonstrating that the secondary average state sampling yields highly accurate and stable results. These findings can significantly improve the procedures and accuracy of land gravelization measurement and enhance the efficiency of fieldwork.

Key words: gravelization land; land gravel coverage; the surface gravel mass per unit area; secondary average state; imitating ecology